

**ПОВЕРХНОСТНОЕ УПРОЧНЕНИЕ ИЗДЕЛИЙ ИЗ ТИТАНОВОГО СПЛАВА Ti-6Al-4V И МЕТАЛЛОКЕРАМИЧЕСКОГО КОМПОЗИТА Ti-6Al-4V/TiC, ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДАМИ АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ**

*Е.А. СИНЯКОВА<sup>1</sup>, А.В. ПАНИН<sup>1,2</sup>, С.А. МАРТЫНОВ<sup>1</sup>, С.В. ПАНИН<sup>1,2</sup>*

<sup>1</sup>Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, Томск

<sup>2</sup>Национальный исследовательский Томский Политехнический Университет, Томск

E-mail: [mea@ispms.tsc.ru](mailto:mea@ispms.tsc.ru)

Несмотря на высокие прочностные свойства изделий из титанового сплава Ti-6Al-4V, полученных методами аддитивных технологий, они характеризуются относительно низкими значениями износостойкости. В настоящее время наблюдается громадный интерес к проведению фундаментальных, поисковых и прикладных исследований в области получения трехмерных металлических матричных композитов на основе Ti-6Al-4V, армированных высокопрочными керамическими частицами TiC [1-3]. Комбинация твердых и жестких керамических частиц и вязкой титановой матрицы обеспечивает высокие механические и трибологические характеристики композита, что открывает широкую перспективу его использования в авиа- и ракетно-космической отрасли.

Недостатком изделий из титанового сплава Ti-6Al-4V, полученных методами аддитивных технологий, является высокая шероховатость их поверхности и неоднородная микроструктура, состоящая из крупных столбчатых первичных бета зерен, содержащих неравновесную мартенситную  $\alpha'$  фазу [4,5]. В свою очередь, в процессе 3D-печати композита Ti-6Al-4V/TiC фаза TiC может приобретать форму грубого дендрита. Более того, большие карбидные частицы могут растворяться не полностью, вызывая формирование пор и трещин, а также охрупчивание титановых композитов [6,7].

Перспективным методом постобработки 3D-напечатанных деталей является их ультразвуковая ударная обработка, основанная на пластическом деформировании поверхности. Данный метод может не только обеспечивать снижение шероховатости поверхности 3D-напечатанных образцов, но и увеличивать твердость и износостойкость их поверхностного слоя без изменения внутренней структуры самого изделия.

В настоящей работе исследованы закономерности формирования морфологии поверхности, микроструктуры и фазового состава 3D-напечатанных образцов из титанового сплава Ti-6Al-4V и композита Ti-6Al-4V/TiC. Продемонстрировано влияние ультразвуковой ударной обработки на закономерности структурно-фазовых превращений и формирование внутренних напряжений в модифицированных поверхностных слоях исследованных образцов.

3D-напечатанные образцы из титанового сплава Ti-6Al-4V и композита Ti-6Al-4V/TiC, были получены методом селективного лазерного плавления (Selective Laser Melting — SLM) порошка титанового сплава Ti-6Al-4V и порошка титанового сплава Ti-6Al-4V и порошка карбида TiC. Полученные SLM-образцы подвергали ультразвуковой ударной обработке на установке И-4/1-2.0 путем возбуждения в обрабатывающем инструменте (индентор) ультразвуковых колебаний. Амплитуда и частота колебаний рабочей поверхности волновода составляли 15 мкм и 23 кГц, соответственно. Скорость сканирования индентора по поверхности пластины при ультразвуковой обработке составляла по оси  $x$ —1.7 мм/с, по оси  $y$ —4.4 мм/с, шаг сканирования  $\sim 0,1$  мкм. Нагрузка на индентор составляла 27 кг. Индентор был изготовлен из твердого сплава Co-WC и его химический состав (в вес.%) представляет собой: 11.47% Co, 78.07% W, 8.60% C, 1.86% O.

Показано, что поверхность исходных SLM образцов из титанового сплава Ti-6Al-4V характеризуется развитым рельефом, состоящим из множества выступов и впадин. Подобная шероховатость SLM образцов из титанового сплава Ti-6Al-4V обусловлена как наличием на их поверхности частично расплавленных частиц порошка, так и волнистым рельефом, сформированным зонами расплава. Среднеквадратичная шероховатость ( $R_q$ )

исходных SLM образцов из титанового сплава Ti-6Al-4V, определенная методом контактной профилометрии, составляет  $R_q=12.7$  мкм.

Исследование морфологии поверхности SLM образцов из порошковой композиции Ti-6Al-4V/TiC показало, что введение тугоплавких карбидных частиц в ванну расплава повышает температуру плавления системы, и, как следствие, мощности лазерного луча оказывается недостаточно для плавления карбидных частиц. В результате шероховатость поверхности SLM образцов из порошковой композиции Ti-6Al-4V/TiC существенно увеличивается и достигает  $R_q=24.1$  мкм. Ультразвуковая ударная обработка как исходных SLM образцов из титанового сплава Ti-6Al-4V, так и SLM образцов из порошковой композиции Ti-6Al-4V/TiC приводит к снижению шероховатости их поверхности до  $R_q=6.0$  и  $R_q=10.0$  мкм, соответственно.

Методами оптической и просвечивающей электронной микроскопии, а также рентгеноструктурного анализа продемонстрировано влияние ультразвуковой ударной обработки на микроструктуру и фазовый состав SLM образцов из титанового сплава Ti-6Al-4V и порошковой композиции Ti-6Al-4V/TiC.

Измерение микротвердости на боковой грани как SLM образцов из титанового сплава Ti-6Al-4V, так и SLM образцов из порошковой композиции Ti-6Al-4V/TiC наглядно демонстрирует, что ультразвуковая ударная обработка приводит к увеличению твердости их поверхностного слоя.

*Работа выполнена в рамках Программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014-2020 годы» Министерства науки и высшего образования РФ; Соглашение № 05.583.21.0089, идентификатор проекта RFMEFI58318X0089.*

#### **Список литературы**

1. Liu S.Y., Shin Y.C. The influences of melting degree of TiC reinforcements on microstructure and mechanical properties of laser direct deposited Ti6Al4V/TiC composites // *Materials and Design*. – 2017. – V. 136. – P. 185–195.
2. Wang J., Li L., Lin P., Wang J. Effect of TiC particle size on the microstructure and tensile properties of TiCp/Ti6Al4V composites fabricated by laser melting deposition. *Optics & Laser Technology*. – 2018. – V. 105. – P. 195–206.
3. Katz-Demyanetz A., Popov V.V., Kovalevsky A., Safranchik D., Koptyug A. Powder-bed additive manufacturing for aerospace application: Techniques, metallic and metal/ceramic composite materials and trends // *Manufacturing Review*. – 2019. – V. 6. – P. 1-13.
4. Attar H., Ehtemam-Haghighi Sh., Kent D., Wu X., Dargusch M.S. Comparative study of commercially pure titanium produced by laser engineered net shaping, selective laser melting and casting processes // *Materials Science and Engineering A*. – 2017. – V. 705. – P. 385–393.
5. Mazur M., Leary M., Sun Sh., Vcelka M., Shidid D., Brandt M. Deformation and failure behaviour of Ti-6Al-4V lattice structures manufactured by selective laser melting (SLM) // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. – 2016. – V. 84. – P. 1391–1411.
6. Pouzet S., Peyre P., Gorny C., Castelnau O., Baudin T., Brisset F., Colin C., Gadaud P. Additive layer manufacturing of titanium matrix composites using the direct metal deposition laser process // *Materials Science and Engineering A*. – 2016. – V. 677. – P. 171–181.
7. Mahamood R.M., Akinlabi E.T., Shukla M., Pityana S. Scanning velocity influence on microstructure, microhardness and wear resistance performance of laser deposited Ti6Al4V/TiC composite // *Materials and Design*. – 2013. – V. 50. – P. 656–666.